

Elektroniczne instrumenty muzyczne

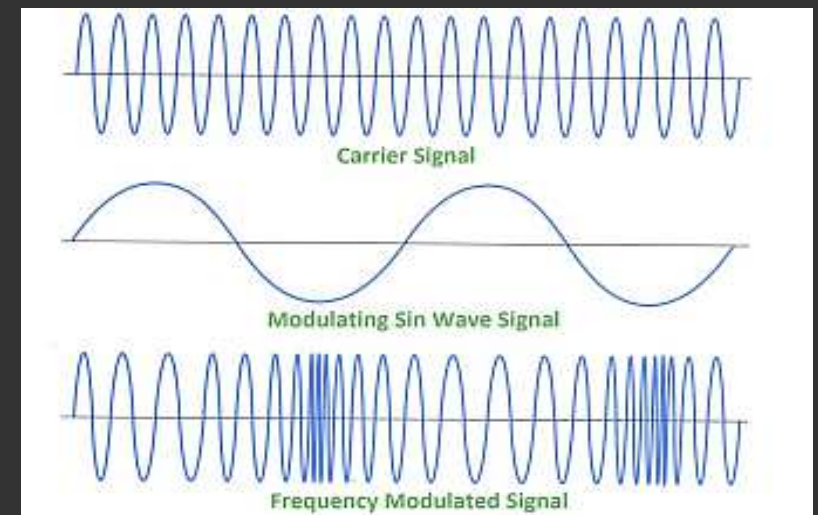
**SYNTEZA METODĄ
MODULACJI
CZĘSTOTLIWOŚCI (FM)
+ zniekształcania fazy (PD)**

Modulacja częstotliwości (FM)

FM – ang. *frequency modulation*

Przypomnienie: zastosowanie FM do transmisji fal radiowych:

- sygnał użyteczny – np. audio,
- sygnał **nośny** (ang. *carrier*) – sinus o wysokiej częstotliwości (np. 99,80 MHz),
- wartości amplitudy sygnału użytecznego **modulują** chwilową **częstotliwość** sygnału nośnego,
- przesyłamy zmodulowany sygnał szerokopasmowy,
- po odebraniu: demodulacja, powrót do początkowego pasma.



FM w syntezie dźwięku

1973 – **John Chowning** publikuje pracę:
*„The Synthesis of Complex Audio Spectra
by Means of Frequency Modulation”*.



- Przy spełnieniu określonych założeń dotyczących częstotliwości sygnałów, uzyskujemy widmo harmoniczne.
- Zmiany amplitudy modulatora wpływają na barwę dźwięku.
- Można zwielokrotnić modulację oraz sumować cząstkowe modulacje.
- Implementacyjnie: prosta i tania metoda **cyfrowej syntezy**.
- Patent w latach 1975-1995.

FM w syntezie dźwięku

Upraszczamy problem do dwóch sygnałów sinusoidalnych:

- sygnał nośny (*carrier*)

$$x_c(t) = A \sin(\omega t)$$

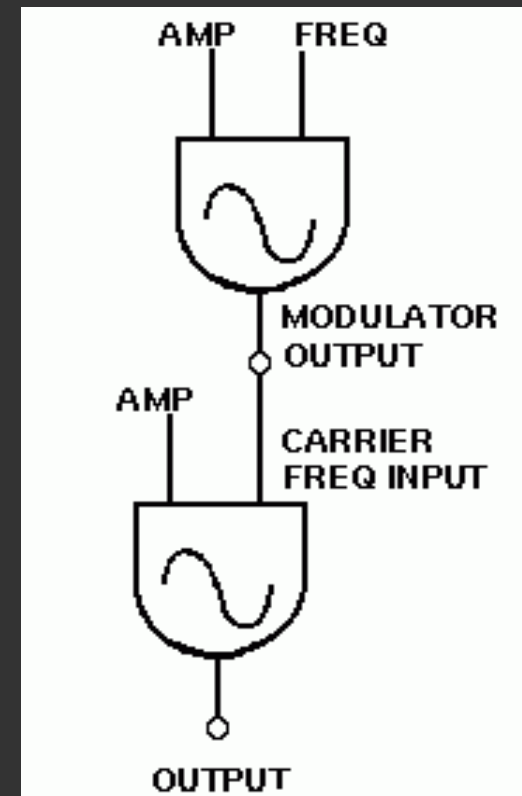
- sygnał modulujący (*modulator*)

$$x_m(t) = I \sin(\beta t)$$

Używamy sygnału modulującego, aby zmieniać (modulować) chwilową częstotliwość sygnału nośnego:

$$x(t) = A \sin[\omega t + x_m(t)]$$

$$x(t) = A \sin[\omega t + I \sin(\beta t)]$$



Modulacja częstotliwości

Jak zmienia się dźwięk w zależności od cz. modulującej?

- Niskie cz. (< 1 Hz): powolne „kołysanie” wysokości dźwięku (efekt LFO z małą częstotliwością).
- Częstotliwości z zakresu 1 Hz – 20 Hz: coraz szybszy efekt wibrato.
- Przekraczamy 20 Hz: dźwięk robi się nieprzyjemny, bardzo szorstki. Powstaje sygnał nieharmoniczny o złożonym widmie.
- Ale w pewnych układach, np. gdy obie częstotliwości są sobie równe, uzyskamy przyjemny dźwięk harmoniczny!

Składowe widma syntetycznego

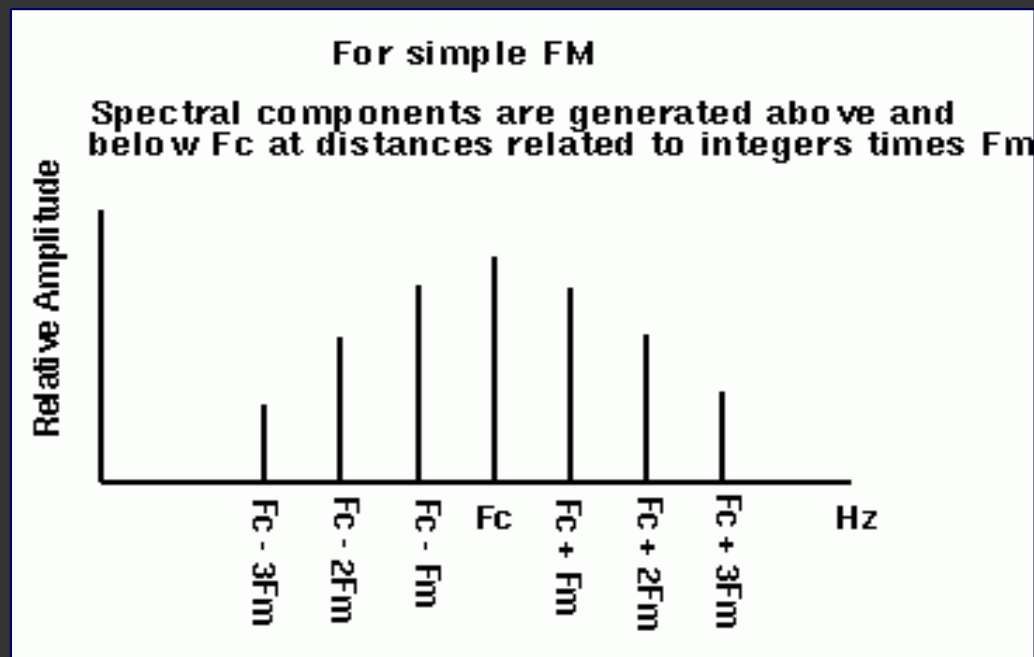
Położenie prążków w widmie dźwięku syntetycznego:

$$f_c \pm k f_m \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

W terminologii FM: wstęga dolna i górna, poniżej i powyżej f_c

Np. $f_c = 500$ Hz, $f_m = 100$ Hz:

..., 100, 200, 300, 400, **500**, 600, 700, 800, 900, ...



„Odbijanie” składowych widma

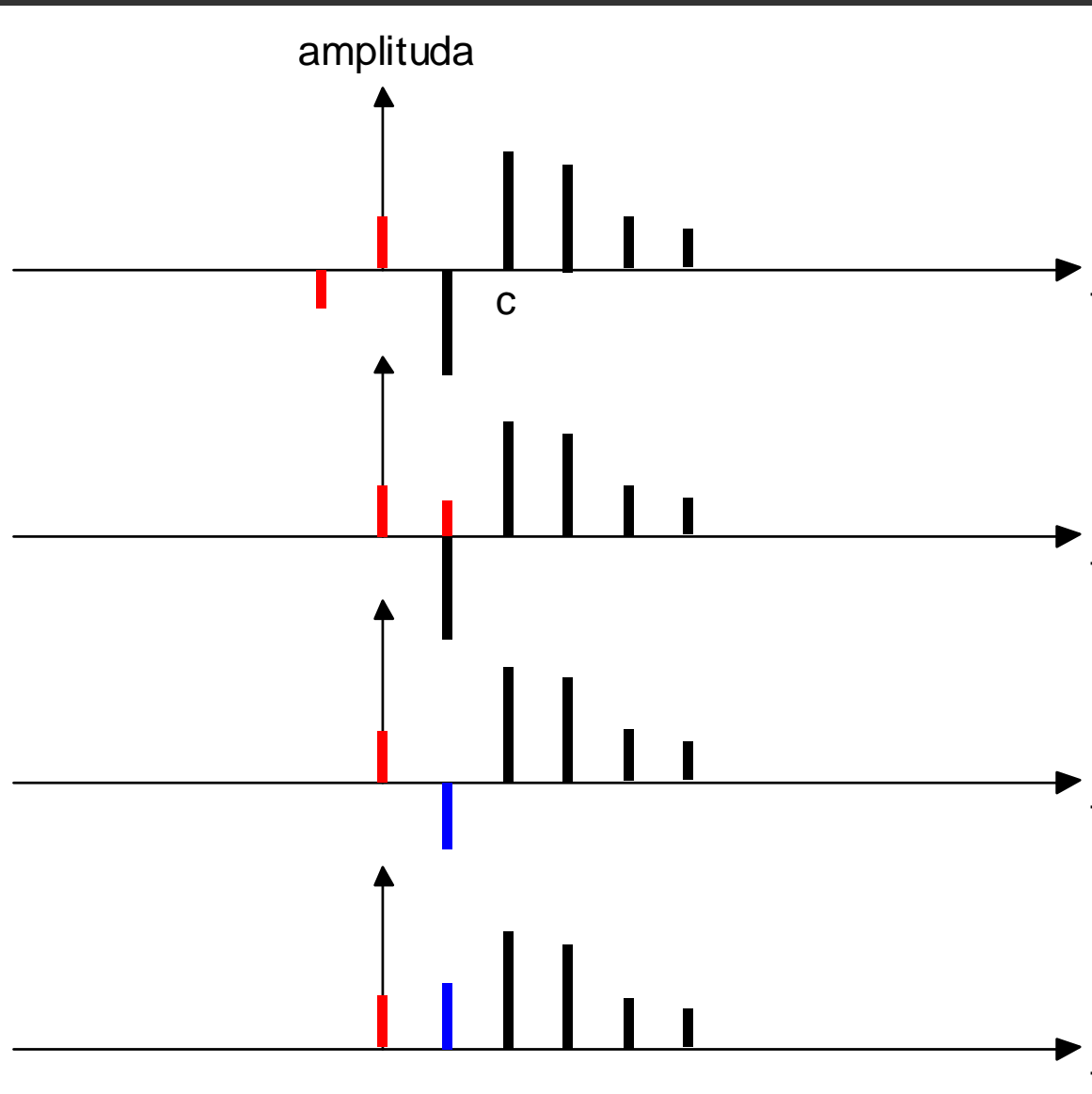
- Co ze składowymi, które „schodzą” poniżej zera?

Np. dla $f_c = 400$ Hz i $f_m = 100$ Hz dostajemy:

$$f_c - 5f_m = 400 - 500 = -100 \text{ Hz}$$

- Wiemy jednak, że: $\sin(-x) = -\sin(x)$
- Zatem:
 - składowa „ujemna” zostaje przeniesiona na częstotliwość dodatnią (odbicie względem zera),
 - następuje zmiana fazy: amplituda „odbitej” składowej zmienia znak,
 - jeśli na tej częstotliwości był już prążek, amplitudy się sumują (z uwzględnieniem znaku!).

„Odbijanie” składowych widma



Widmo z „ujemną”
składową

„Odbijamy” ze zmianą
znaku

Sumujemy amplitudy
uwzględniając fazy

Obliczamy wartości
bezwzględne amplitud

Współczynnik modulacji

Współczynnik modulacji w_m – stosunek częstotliwości **modulującej** do częstotliwości **nośnej**.

$$w_m = \frac{f_m}{f_c} = \frac{N_2}{N_1}$$

- Aby uzyskać widmo **harmoniczne**, współczynnik modulacji musi być wyrażony stosunkiem liczb naturalnych N_2 i N_1 .
- Najczęściej używa się niskich współczynników: 1:1, 2:1, 3:1, 3:2, itp.

Współczynnik modulacji

Typowe przykłady praktycznie stosowanych współczynników modulacji (częstotliwości dla $f_c = 400$ Hz):

- **1:1** – wszystkie prążki w widmie
400, 800, 1200, 1600, 2000, ...
- **2:1** – tylko prążki parzyste ($k = 0, 2, 4, \dots$)
400, 1200, 2000, 2800, ...
- **3:1** – co trzecia harmoniczna zerowa
400, 800, 1600, 2000, 2800, ...

Przykład widma nieharmonicznego:

- $w_m = \sqrt{2} : 1$

Wsp. modulacji a częstotliwość podstawowa

UWAGA: częsty błąd.

Częstotliwość nośna nie musi równać się cz. podstawowej!

Częstotliwość podstawowa: częstotliwość pierwszego prążka w szeregu harmonicznym.

- $f_c = 500 \text{ Hz}, f_m = 500 \text{ Hz} \rightarrow f_0 = 500 \text{ Hz}$
(częstotliwości są zawsze równe gdy wsp. modulacji 1:1)
- $f_c = 500 \text{ Hz}, f_m = 100 \text{ Hz} \rightarrow f_0 = 100 \text{ Hz}$
(pierwszy prążek jest na 100 Hz: $500 - 4 \times 100$)
- $f_c = 200 \text{ Hz}, f_m = 300 \text{ Hz} \rightarrow f_0 = 100 \text{ Hz} (!!!)$
..., -700, -400, -100, 200, 500, 800, ... (odbijamy:)
100, 200, 400, 500, 700, 800, ...

Indeks modulacji

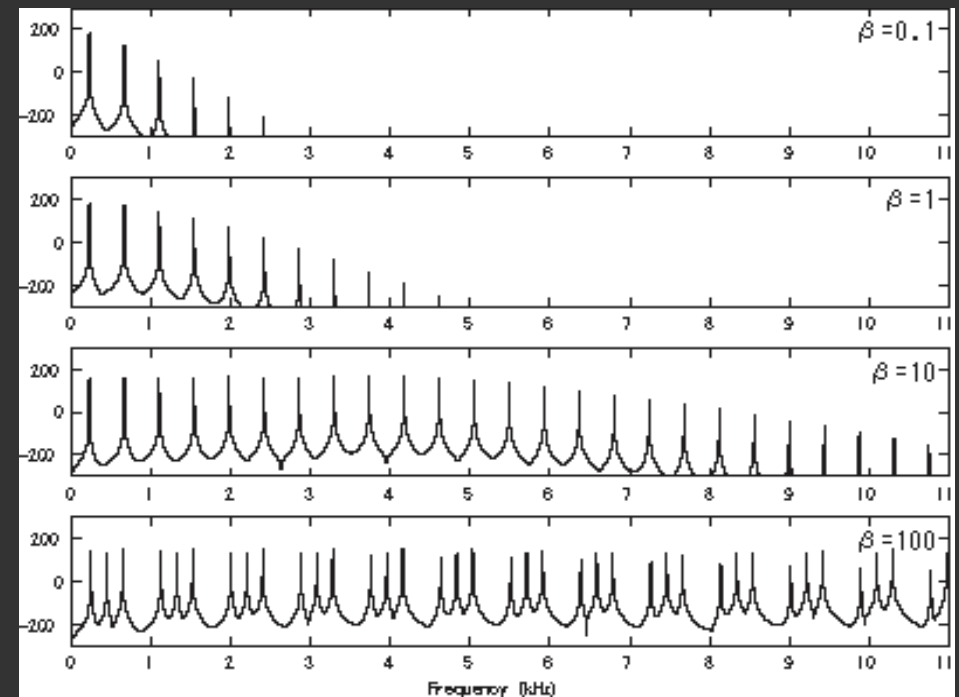
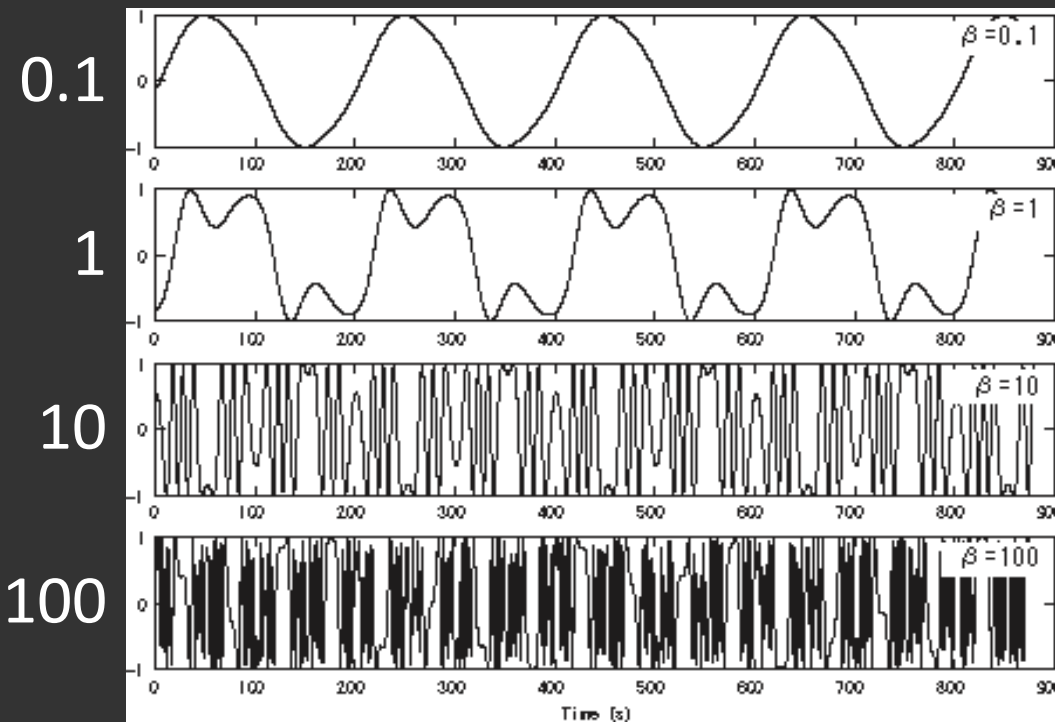
- Indeks modulacji (I , *modulation index*, nie mylić ze współczynnikiem modulacji) = amplituda sygnału modulującego.
- Wyznacza zakres częstotliwości, w jakim zachodzi modulacja ($\Delta f = I \cdot f_m$).
- Ma wpływ na liczbę składowych widma: większy indeks to bogatsze widmo. Reguła Carsona:
$$B = 2(\Delta f + f_m) = 2 f_m (I + 1)$$
- Decyduje o amplitudach prążków widma, przez co ma decydujący wpływ na barwę (brzmienie) dźwięku!
- Praktyczne wartości indeksu to zakres od 10 do 100.

Wpływ indeksu modulacji na sygnał

Częstotliwość nośna 220 Hz, modulująca 440 Hz

Postać czasowa

Widmo



Amplituda składowych widma

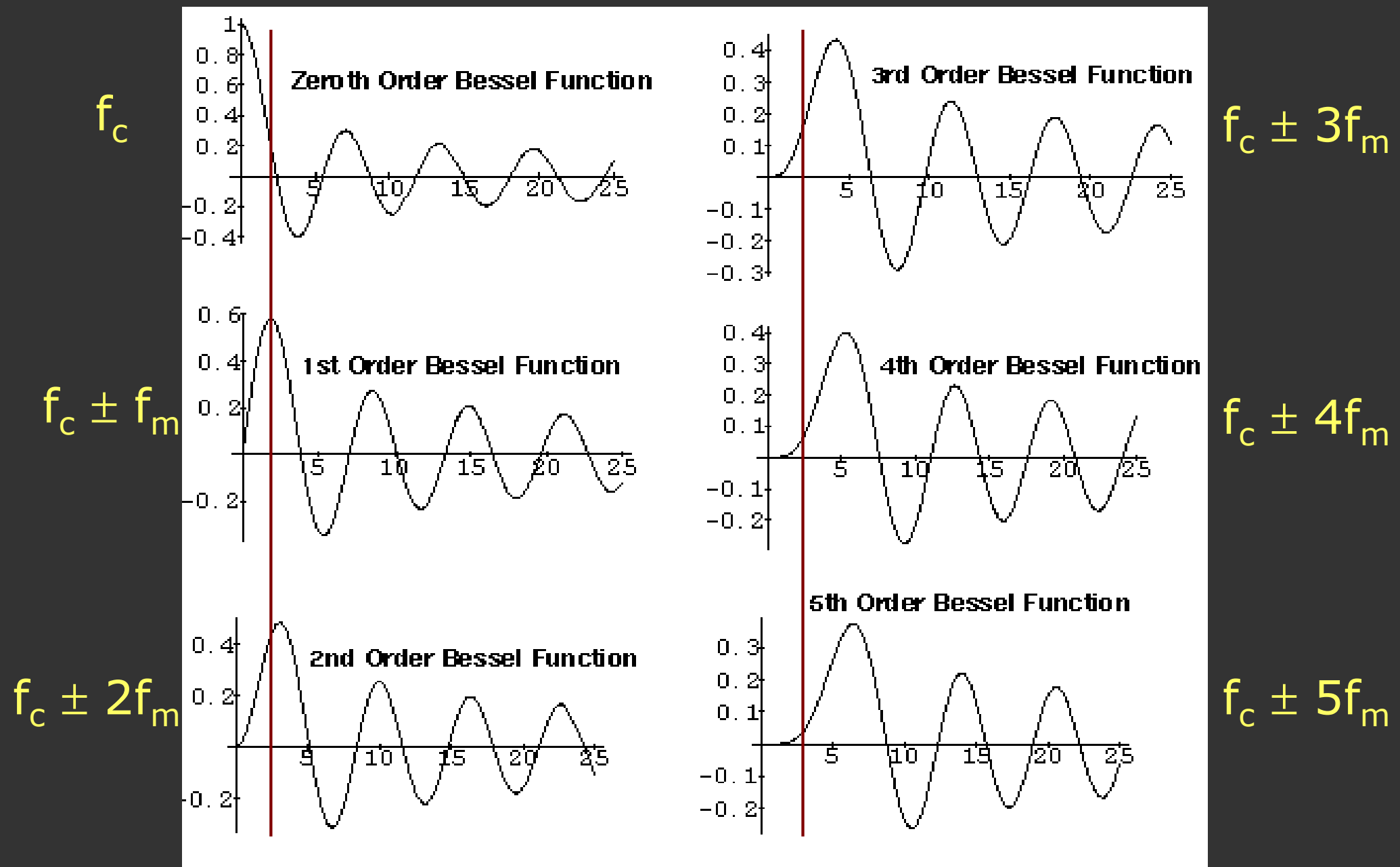
Amplitudy poszczególnych składowych widma:

$$\begin{aligned} x(n) = A \{ & J_0(I) \sin(\omega_c nT) \\ & + J_1(I) \cdot [\sin(\omega_c + \omega_m) nT - \sin(\omega_c - \omega_m) \cdot nT] \\ & + J_2(I) \cdot [\sin(\omega_c + 2\omega_m) nT + \sin(\omega_c - 2\omega_m) \cdot nT] \\ & + J_3(I) \cdot [\sin(\omega_c + 3\omega_m) nT - \sin(\omega_c - 3\omega_m) \cdot nT] \\ & + \dots \dots \dots \} \end{aligned}$$

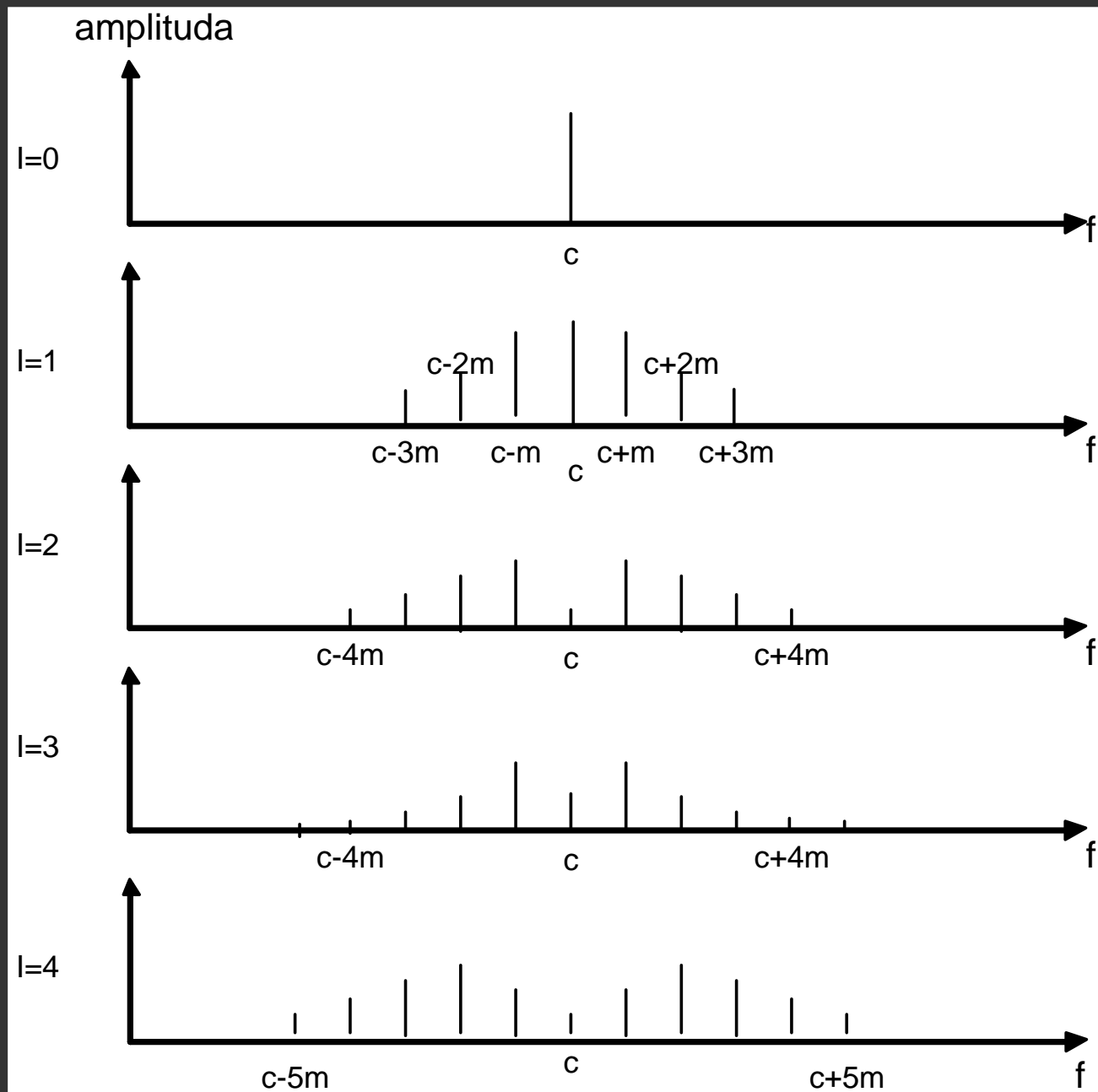
Uwaga: „nieparzyste” składowe dolnej wstęgi mają odwróconą fazę – znak minus!

$J_n(I)$: funkcje Bessela rzędu n , argument: indeks modulacji.

Funkcje Bessela pierwszego rodzaju (J)



Wpływ indeksu modulacji na widmo



Obliczanie widma syntetycznego

Parametry: częstotliwość nośna f_c , modulująca f_m ,
indeks modulacji l .

Przepis na widmo syntetyczne sygnału FM:

- obliczyć częstotliwości składowych ($f_c \pm k f_m$),
- obliczyć amplitudy składowych [$J_k(l)$], pamiętać o znaku minus dla dolnej wstęgi dla nieparzystych k ,
- uwzględnić odbicie składowych o częstotliwościach ujemnych ze zmianą znaku,
- zsumować amplitudy nakładających się składowych,
- obliczyć wartości bezwzględne amplitud składowych.

Uwaga: nie da się obliczyć parametrów pozwalających na uzyskanie żądanego kształtu widma!

Parametry syntezy FM

Podsumujmy.

- **Częstotliwości:** nośna (f_m) i modulująca (f_m) mają wpływ na położenie prążków w widmie syntetycznym:
 - decydują o harmonicznosci widma (a więc o barwie),
 - dla widma harmonicznego: wyznaczają wysokość.
- **Indeks modulacji (I)** decyduje o amplitudach prążków (pośrednio o liczbie znaczących prążków w widmie)
 - ma decydujący wpływ na barwę dźwięku,
 - aby brzmienie zmieniało się (aby dźwięk był „żywy”), musimy zmieniać wartość indeksu modulacji.

Operator

Operator jest podstawowym blokiem układu syntezy FM.

Składa się on z:

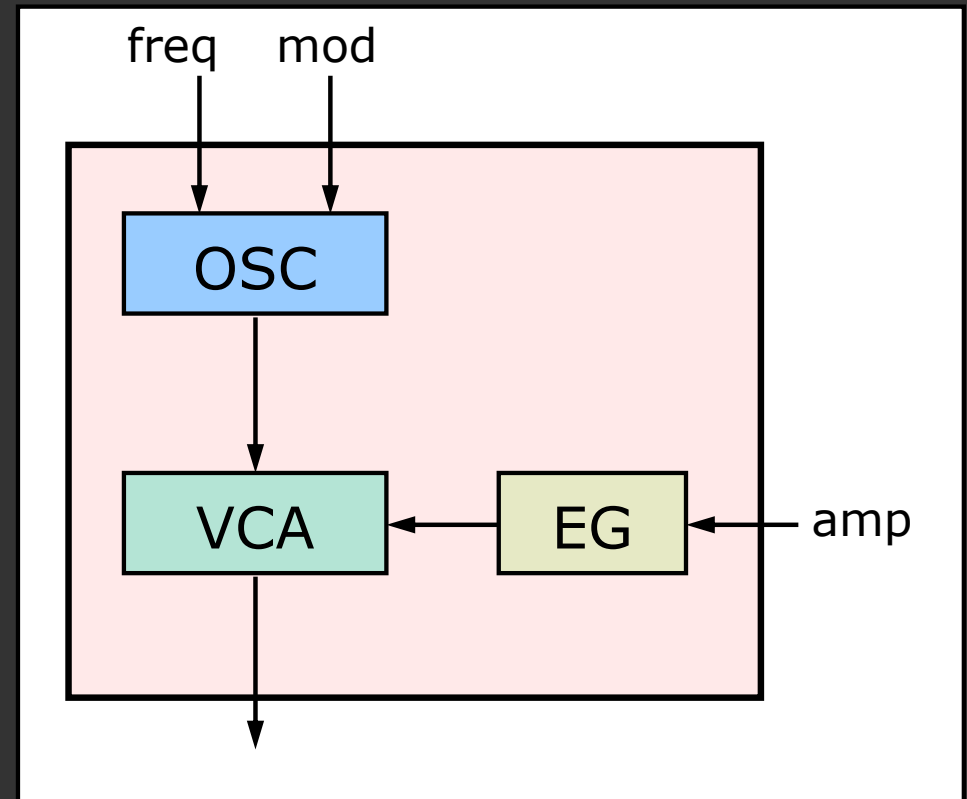
- generatora sygnału sinusoidalnego (OSC)
- wzmacniacza (VCA)
- generatora obwiedni (EG)

freq – stała częstotliwość

mod – częstotliwość modulująca

częstotliwość generowana przez OSC

= freq + mod



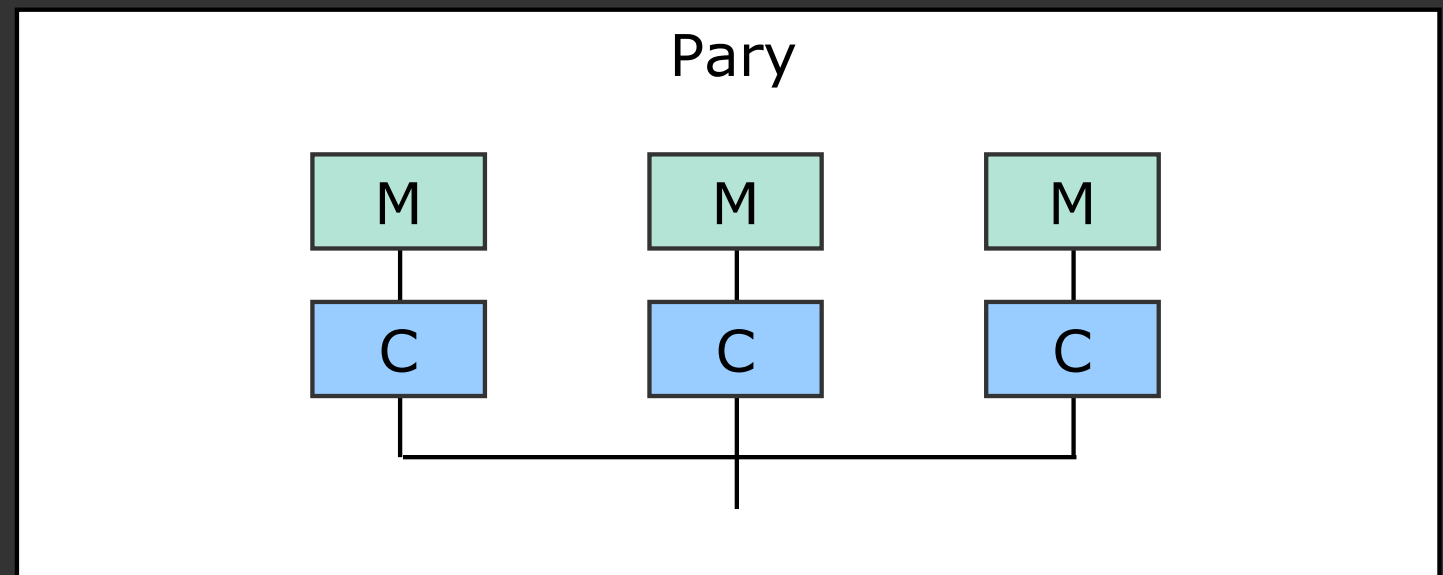
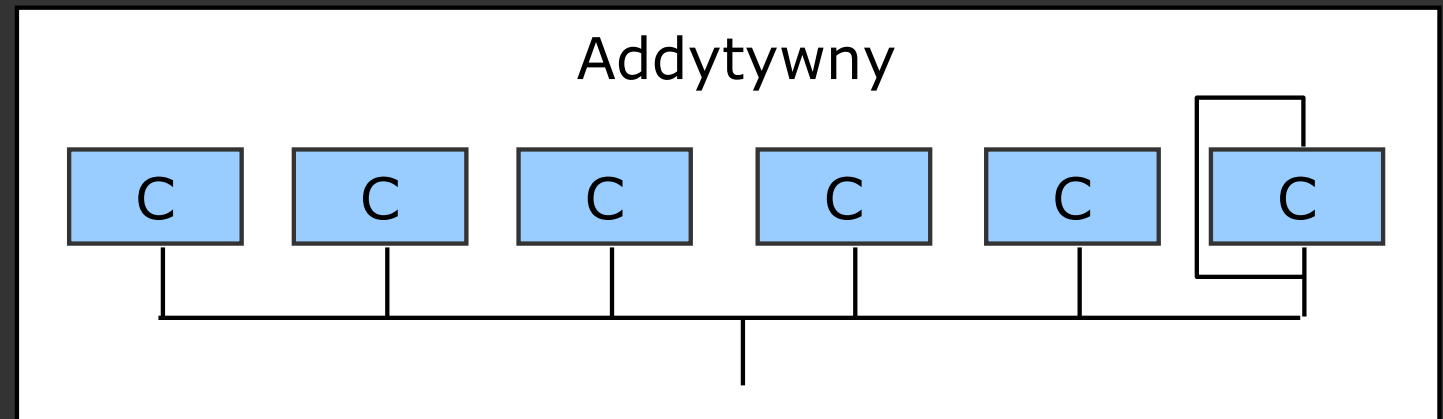
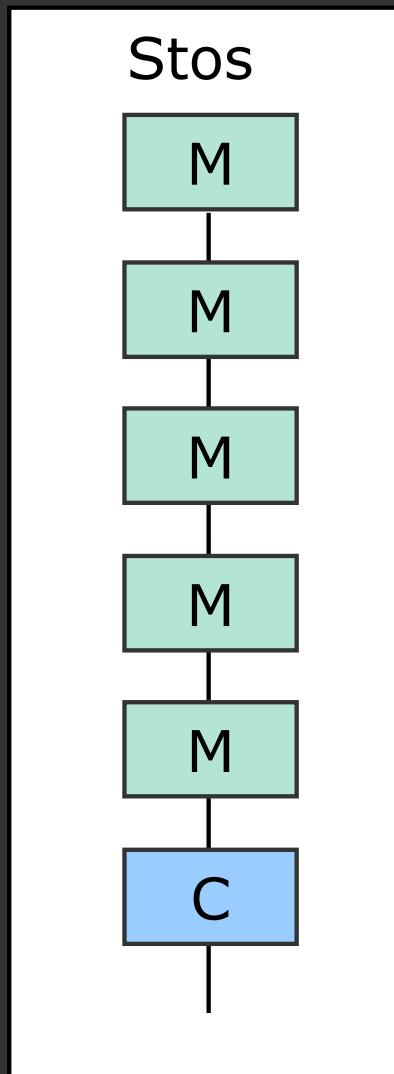
Algorytm FM

Połączenie operatorów tworzy **algorytm** syntezy FM.

- Dwa operatory (*Simple FM, 2-op FM*): jeden modulator, jeden generator nośnej – najprostszy algorytm, za mało aby uzyskać ciekawe dźwięki.
- W praktyce stosuje się więcej operatorów (często 6), które można łączyć na wiele sposobów w algorytmy.
- Te same operatory z tymi samymi ustawieniami, ale połączone w różny sposób, generują całkowicie inne brzmienia!

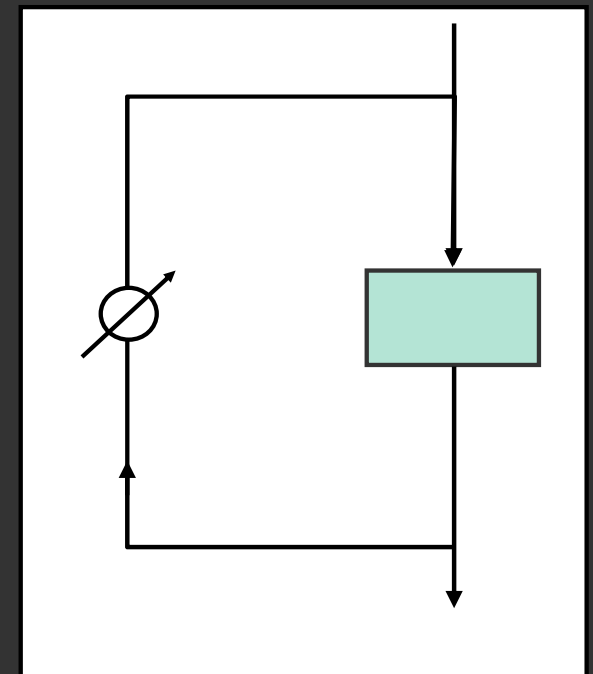
Przykłady algorytmów dla 6 operatorów

M – modulator, C – generator nośnej



Sprzężenie zwrotne

- Zmodulowany sygnał wraca na wejście i jest ponownie modulowany.
- Stopień sprzężenia zwrotnego jest regulowany.
- Operator moduluje sam siebie!
- W ten sposób mogą powstawać dźwięki o bardzo złożonym widmie, np. o charakterze szumowym



Ustawianie parametrów w synteźatorze

- Wciśnięty klawisz wyznacza częstotliwość bazową (zalecane: = częstotliwości podstawowej).
- Dla każdego operatora ustawia się **mnożnik** częstotliwości. Np. ustawienie go na 2,0 oznacza, że generowana częstotliwość będzie dwukrotnie większa od częstotliwości bazowej.
- Amplitudy nośnych (operatorów wyjściowych) – poziom sygnału wyjściowego, EG sterują obwiednią (głośnością) dźwięku.
- Amplitudy modulatorów – indeksy modulacji, ich zmiany modyfikują brzmienie.

Ustawianie parametrów w synteźatorze

Brzmienie dźwięku regulujemy za pomocą indeksów modulacji, czyli amplitud sygnałów wychodzących z operatorów modulujących, czyli tych, które są podłączone do innych operatorów (a nie do wyjścia).

Wartości te możemy modyfikować za pomocą:

- generatorów obwiedni w operatorach modulujących – pozwalają uzyskać odpowiednie brzmienie szczególnie w fazie ataku,
- bloków LFO – modulacje w fazie podtrzymania,
- ręcznych manipulatorów, np. pokręta modulacji.

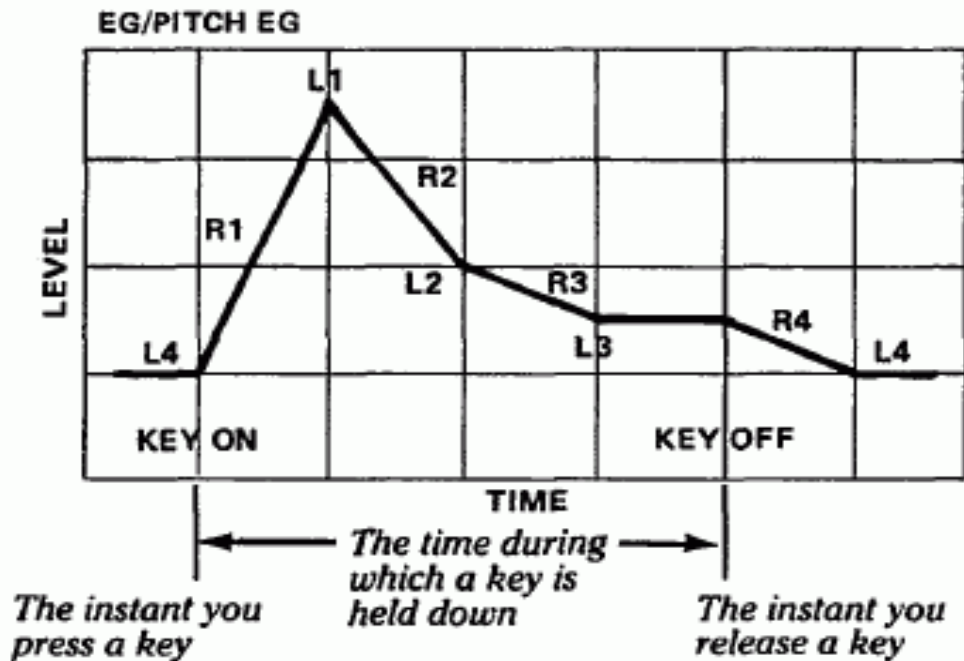
Yamaha DX7

Yamaha DX7 (1983 r.) – najpopularniejszy instrument FM:

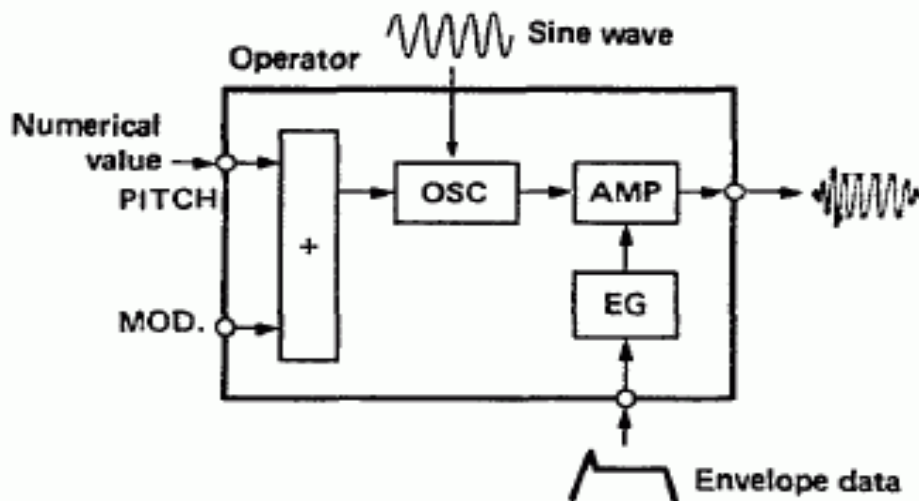
- 6 operatorów,
- 32 ustalone algorytmy,
- w każdym operatorze: ustawianie mnożnika częstotliwości, amplitudy, obwiedni oraz sprzężenia,
- obwiednia – 4 odcinki, regulowany czas trwania i poziom,
- modulatory (LFO) i bloki efektów brzmieniowych,
- 16-głosowa polifonia,
- pamięć wewnętrzna i zewnętrzna



Yamaha DX7

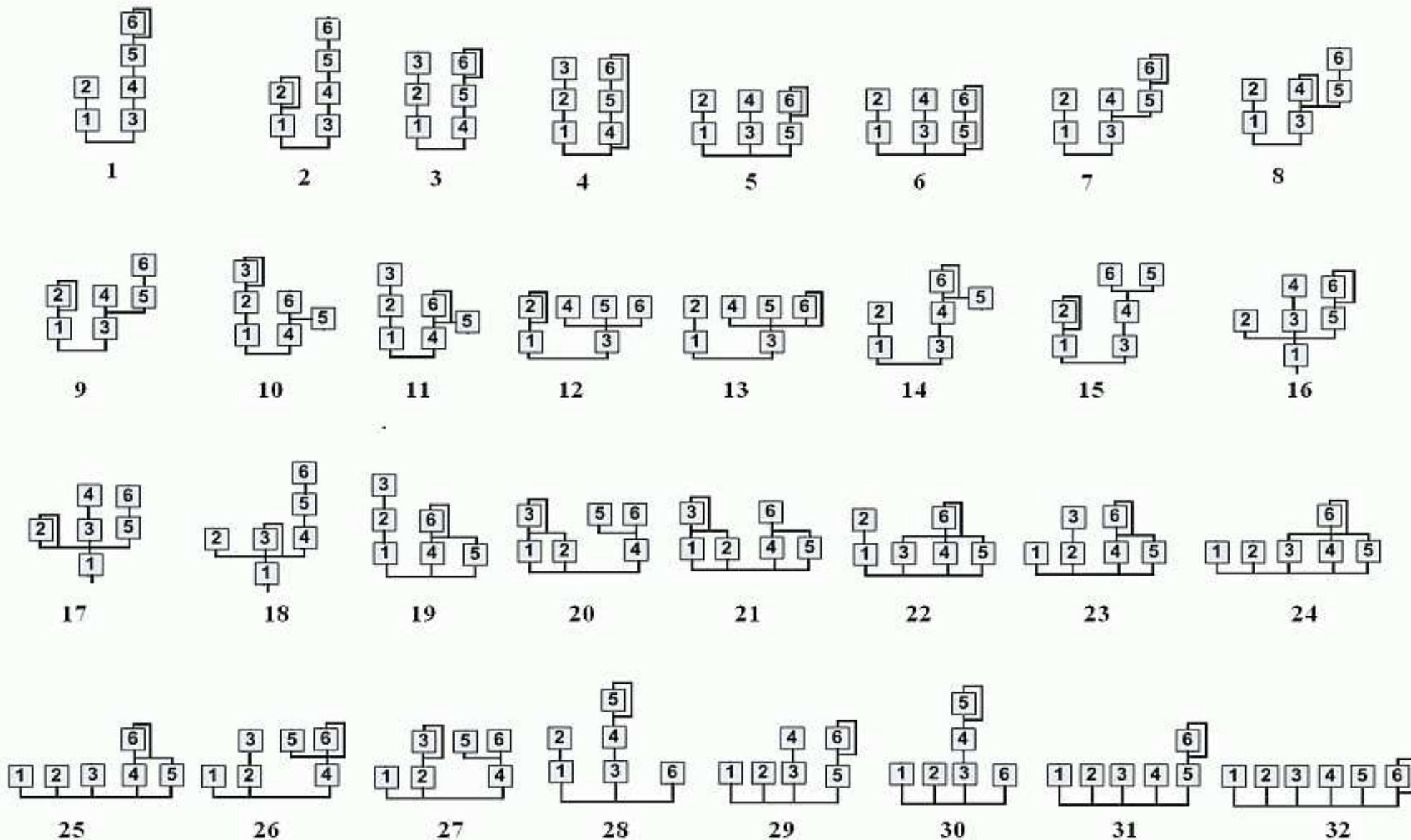


Obwiednia



Operator

Yamaha DX7 - wszystkie 32 algorytmy



Synteza FM w kartach dźwiękowych PC

- Układ OPL3 firmy Yamaha przeznaczony do kart dźwiękowych PC.
- Stosowano go w kartach *Creative Labs SoundBlaster 2/Pro/16* oraz pochodnych (ok. 1991-94).
- Bardzo uproszczona synteza: 2 algorytmy 2-op, 4 algorytmy 4-op.
- Zgodność ze standardem General MIDI: brzmieniom przypisano nazwy instrumentów. Słaba wierność brzmienia, kiepska opinia o syntezie.
- Wyparte przez karty z układami opartymi na nagranych próbkach instrumentów.

Instrumenty programowe FM

Instrumenty programowe FM – emulacja cyfrowych syntezyatorów (NI FM7 i FM8) lub własne implementacje.

Zachowują wszystkie cechy klasycznej syntezy FM.

Udoskonalenia:

- operatory mogą generować różne sygnały, nie tylko sinusy – zmienia to charakter modulacji,
- dowolne łączenie operatorów w algorytmy (macierze modulacji),
- dodatkowe moduły (efekty, modulatory).



Zalety i wady metody FM

Zalety metody modulacji częstotliwości:

- ciekawe, nowatorskie brzmienia (z punktu widzenia muzyka we wczesnych latach 80.),
- prosta i tania implementacja w porównaniu z instrumentami analogowymi,
- stabilność wysokości dźwięku,
- duże możliwości wpływania na brzmienie.

Wady metody modulacji częstotliwości:

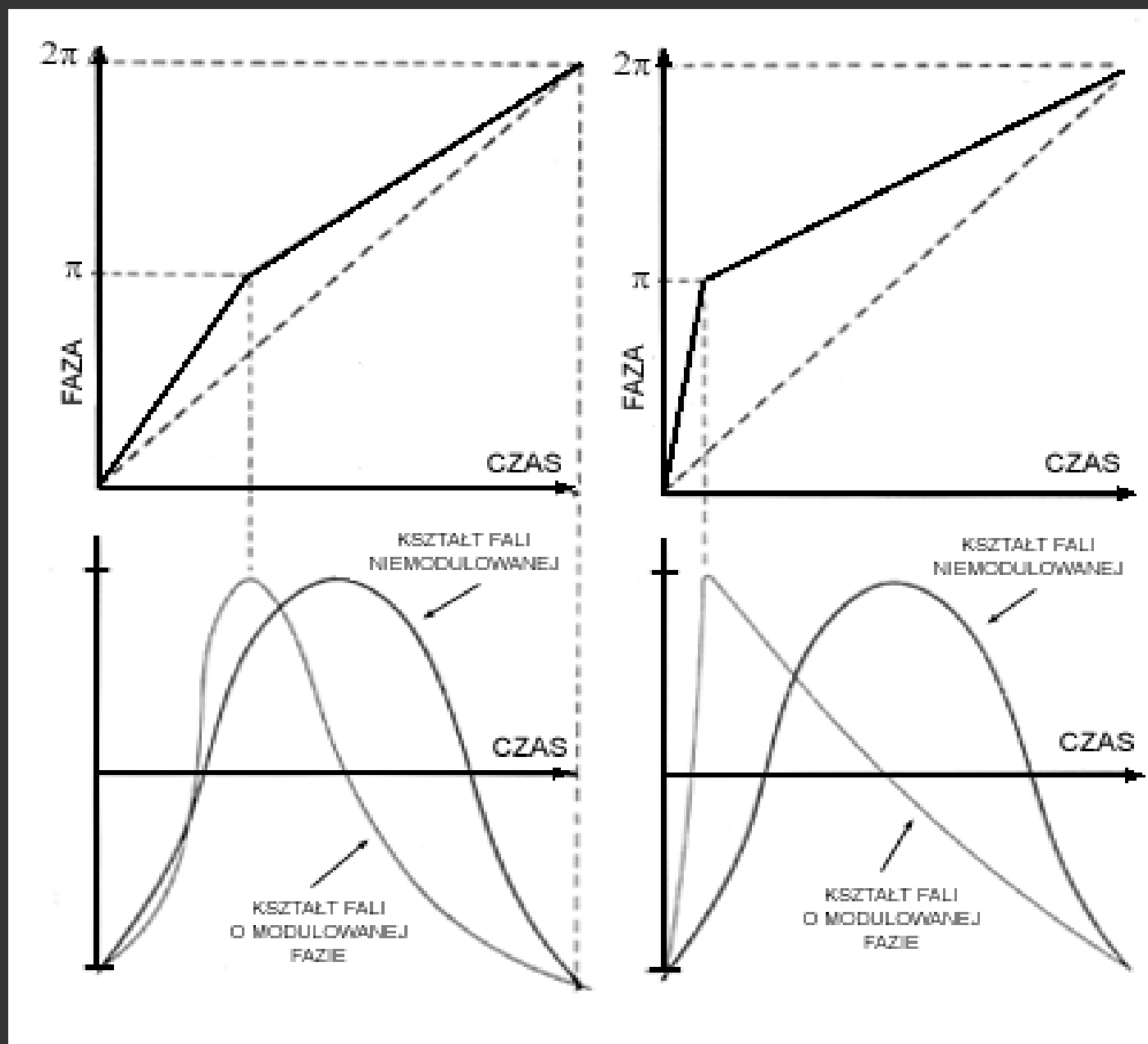
- mało intuicyjny wpływ parametrów na brzmienie,
- zdaniem niektórych: zbyt „plastikowe” brzmienia.

METODA ZNIEKSZTAŁCANIA FAZY (PD)

Metoda **zniekształcania fazy** – ang. *phase distortion* (PD)

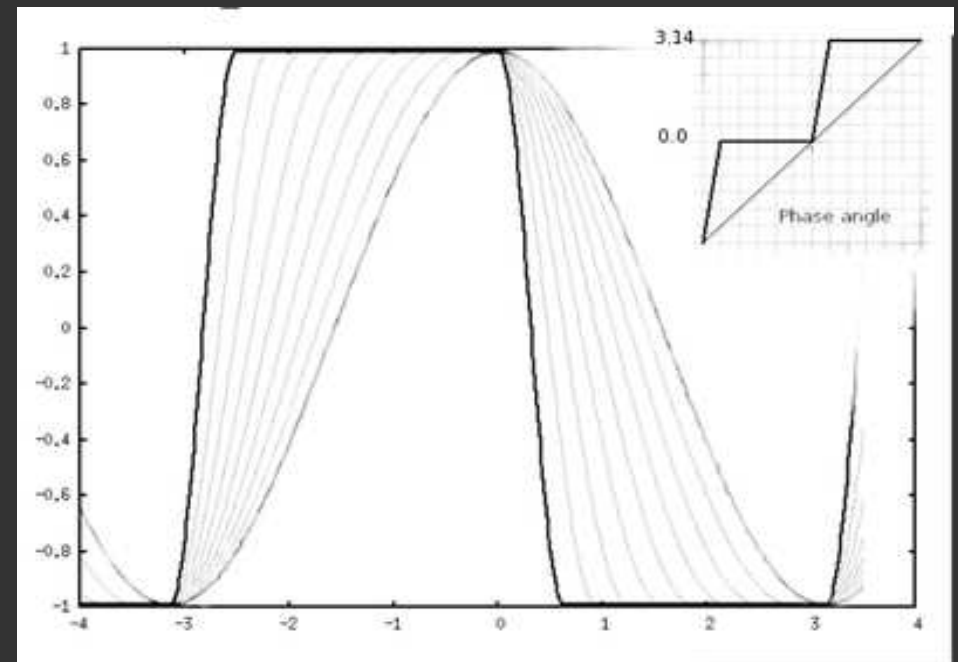
- Metoda syntezy opracowana i wykorzystana komercyjnie przez firmę Casio w instrumentach serii CZ (1985-1988).
- Należy również do cyfrowych metod matematycznych.
- Charakteryzuje się „mocno syntetycznym” brzmieniem.
- Polega na dynamicznej zmianie fazy sygnału sinusoidalnego odczytywanego z generatora tablicowego (pamięci) poprzez ciągłą zmianę prędkości odczytu.
- Na skutek zniekształcania fazy, do sygnału dodawane są harmoniczne.

Ilustracja zniekształcania fazy



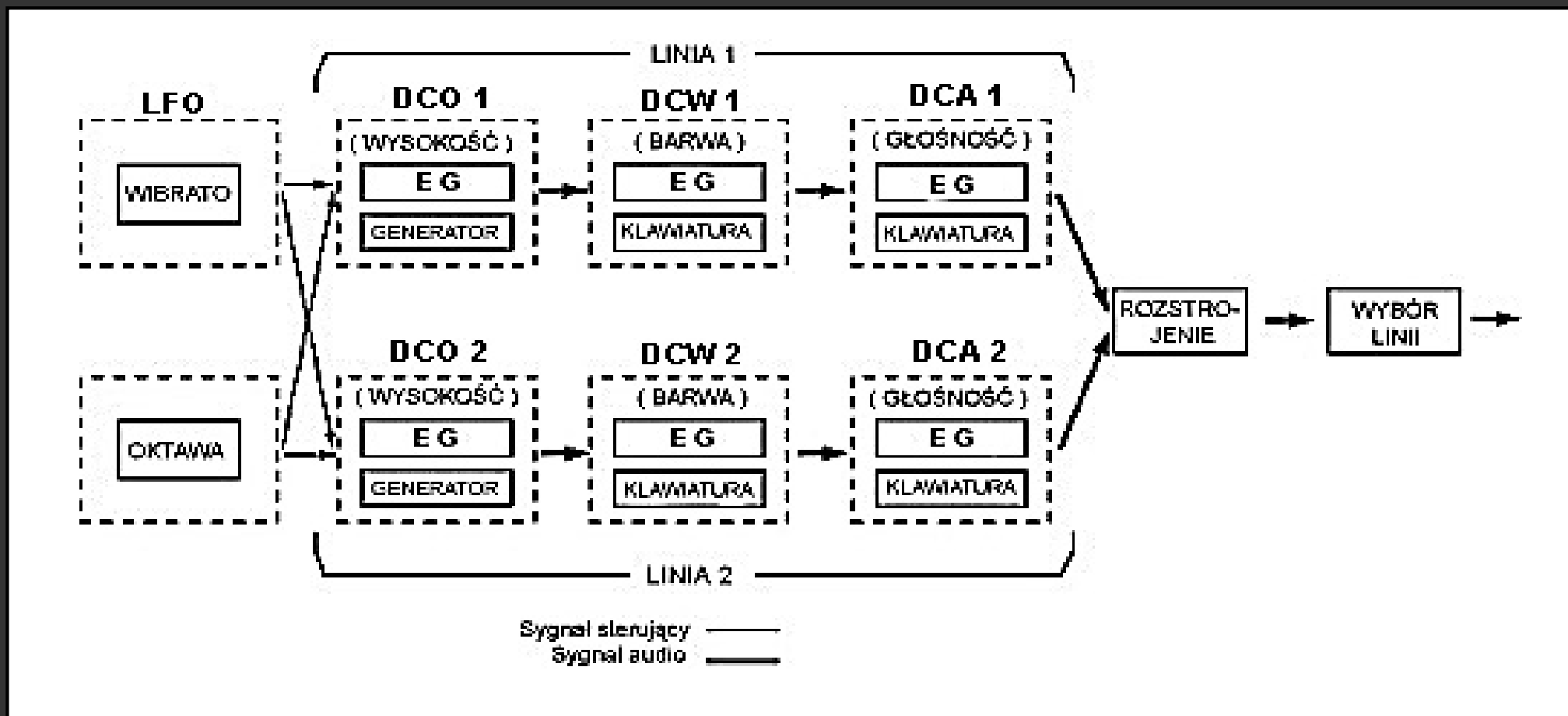
Metoda zniekształcania fazy

- W praktyce, efekt brzmieniowy uzyskiwano metodą płynnych zmian brzmienia, za pomocą sterowania stopniem zniekształcania fali w zakresie od 0 do 1:
 - 0: sygnał sinusoidalny,
 - 1: sygnał docelowy, np. fala prostokątna
- Stopień zniekształcenia jest regulowany za pomocą generatorów obwiedni.
- „Morfing” brzmienia.



Instrument PD

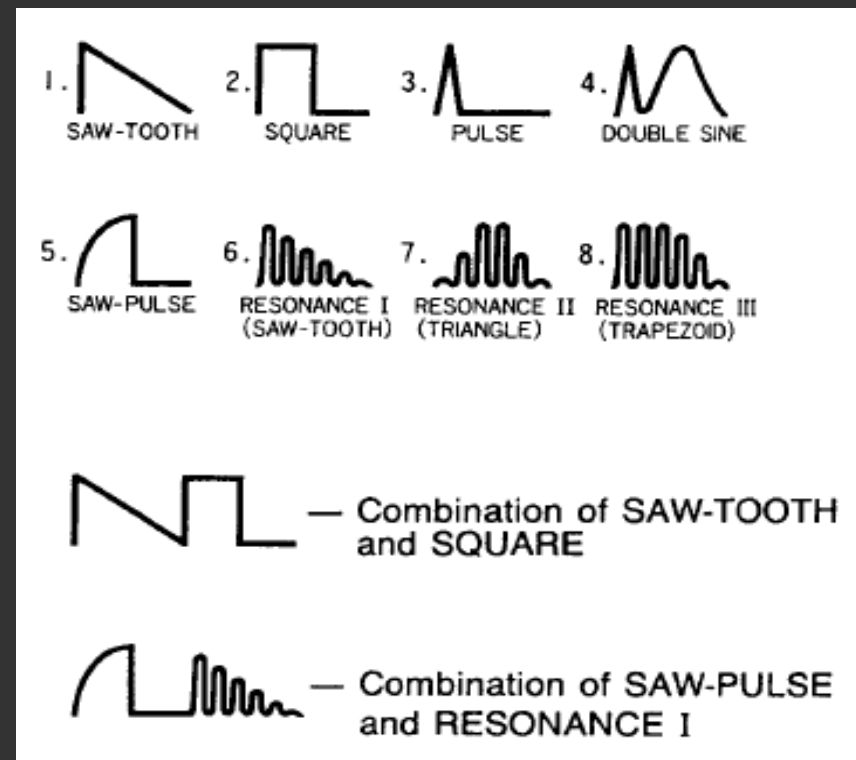
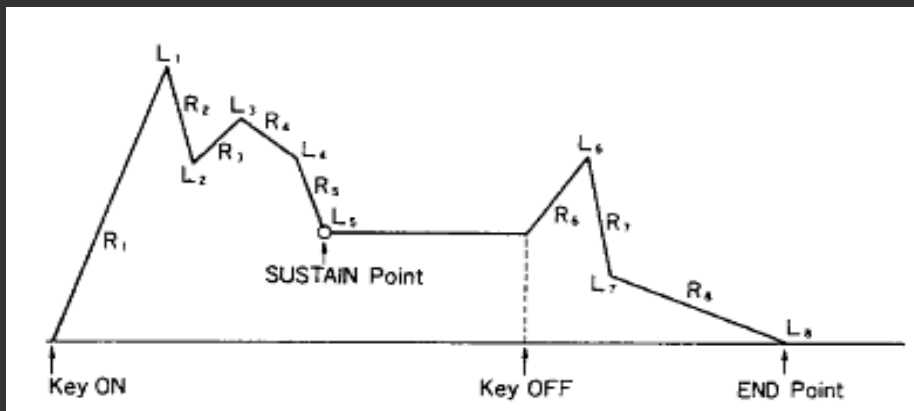
Schemat instrumentu CASIO CZ-01



DCW – *Digitally Controlled Waveshaper*

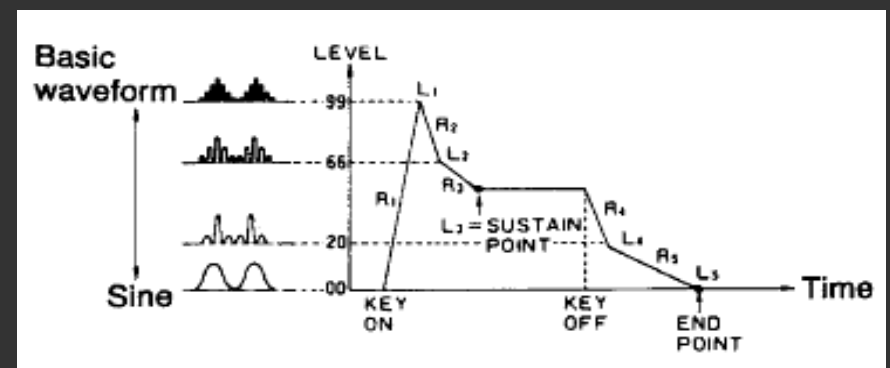
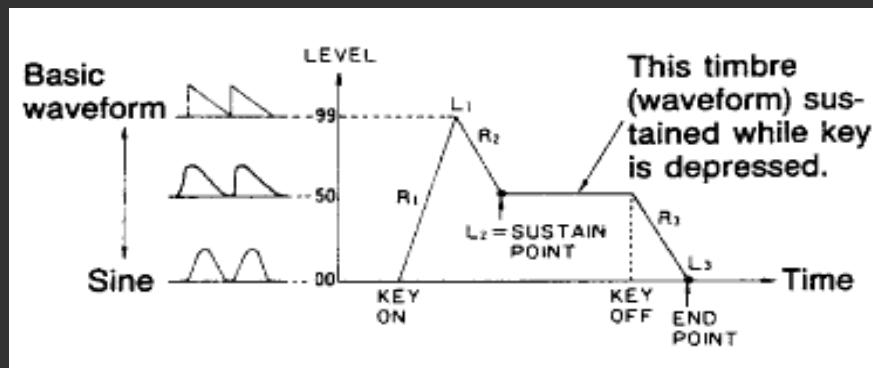
Instrument PD

- 8 podstawowych kształtów fali, zapisane w tablicy próbek.
- Możliwość łączenia kształtów w pary - w sumie 33 możliwe kształty fali.
- Obwiednia steruje parametrami syntezy.



DCW - Digitally controlled waveshaper

- Obwiednia steruje stopniem zniekształcenia sygnału:
 - 0: sinus (sygnał nie zniekształcony)
 - 99: wybrany kształt fali (pełne zniekształcenie)
- *Key follow*: maksymalne zniekształcenie zależne od numeru klawisza.
- *Velocity*: zmiana maksymalnego stopnia zniekształcenia fali w zależności od prędkości naciskania klawisza.



Instrumenty Casio CZ

CZ-101 (1985)



CZ-5000 (1985)



CZ-1 (1986)



Zalety i wady metody PD

Zalety metody zniekształcania fazy:

- możliwość tworzenia nowych brzmień,
- prostota realizacji, niski koszt,
- łatwa obsługa (mało parametrów).

Wady metody przekształcania fali:

- mała kontrola nad widmem sygnału,
- mniejsze możliwości brzmieniowe niż w metodzie FM („plastikowe”, „zabawkowe” brzmienia, co jednak ma swój urok).

Literatura

- J. Chowning: The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation. Journal of Audio Engineering Society, Vol. 21, No. 7, pp. 526-534.
- Yamaha DX7 - instrukcja obsługi i inne:
<https://homepages.abdn.ac.uk/mth192/pages/html/dx7.html>
- NI FM8 – programowy syntezytor FM (komercyjny):
<http://www.native-instruments.com/index.php?id=fm8>
- WaveFM – prosty syntezytor FM (j. francuski): <http://hrsoft.free.fr/WaveFM/>
- Casio CZ-1 Operation Manual: <http://www.synthzone.com/midi/casio/cz1/>
- Casio Sound Synthesis Handbook:
<http://www.vintagesynth.com/manuals/CasioCZSeries-SoundSynthesisHandbook.pdf>
- Vintage Synthe Explorer: www.vintagesynth.com
- Wikipedia (wersja angielska)